

# Gemi dalga direncinde lineer olmayan etkilerin hesaplamalı olarak incelenmesi

Devrim Bülent DANIŞMAN\*, Ömer GÖREN

İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü, 80626, Ayazağa, İstanbul

## Özet

Gemi dalga direncini doğru olarak hesaplayabilmek gemi-form dizaynı açısından vazgeçilmez bir öneme sahiptir. Bu çalışmada gemi etrafındaki akışta lineer olmayan serbest su yüzeyi sınır koşullarını kullanan bir yöntem geliştirilmiştir. İteratif bir algoritma ile çalışan bu yöntemde lineer olmayan serbest su yüzeyi koşulları, deforme olmuş serbest su yüzeyi üzerinde uygulanmaktadır. İterasyon adımlarında gemi ile serbest su yüzeyinin tam bir ara kesitinin alınması sayesinde geminin ıslak alanı gerçekte olduğu gibi alınabilmektedir. Çalışmanın sonuçlarının irdelenmesi amacıyla örnek bir gemi geometrisi (Seri 60,  $C_B=0.60$ ) alınmış ve sonuçlar deneylerle karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar, geliştirilen yöntemle elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Dalga direnci, lineer olmayan serbest su yüzeyi sınır koşulları, iteratif çözüm.

## Computational investigation of non-linear effects in ship-wave resistance

### Abstract

Computing ship-wave resistance has an indispensable importance in hull form design. In this study to calculate ship-wave resistance more accurately a method which utilizes non-linear free surface boundary conditions for the flow around the hull is developed. In this method the free surface boundary conditions are imposed on the deformed free surface iteratively. At the iteration steps, by the help of using interface of deformed free surface and ship-hull geometry, the wetted surface involved in the computations has been taken more realistic. Using exact wetted surface of the ship let determine the effect of the ship's geometry above the still water level on the wave resistance. To show the results of the study a reference geometry (Series 60,  $C_B=0.60$ ) is put to the computations and the results are shown comparatively. Comparisons made show the results obtained from the method developed are close to those of obtained from the experimental studies. As an application of a hull form design problem, effects of changes in the flare geometry on the flow around the ship has been computed by using the algorithm developed. This application proves that the algorithm developed in this study can be used as a design tool for optimizing the geometry above still water level.

**Keywords:** Ship-wave resistance, non-linear free surface boundary conditions, iterative solution.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Devrim Bülent DANIŞMAN. Bulent.danisman@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 63 92 dahili: 6392. Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Gemi dalga direncinde lineer olmayan etkilerin hesaplamalı olarak incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 08.10.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 02.12.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.05.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Gemi direncinin ve onun önemli bir bileşeni olan dalga direncinin doğru bir şekilde, yeterli hassasiyetle hesaplanması bir yüzyıldan fazladır hidrodinamikçileri meşgul etmektedir. Dalga direnci, gemi toplam direnci içerisinde hıza bağlı olarak belli bir oran oluşturur ve gemi dizaynı açısından büyük bir öneme sahiptir. Dalga direncinin gemi formu değişikliklerine karşı çok hassas olması, gemi hidrodinamiği alanında çalışan araştırmacıların da özel bir ilgisini çekmektedir.

Gemi dalga direncinin sayısal ya da analitik olarak hesaplanması için, problem tanımlanırken çözümü kolaylaştırıcı kabullerin yapılması ve özel tekniklerin geliştirilmesi gerekmiştir. Teorik dalga direnci hesaplarında ilk önemli atılımı Michell (1898) yapmıştır. Bu çalışmada, gemi dalga direncinin gemi geometrisi –su hatlarının gemi boyunca olan eğimleri- cinsinden bir integral ile hesaplanabileceği, ince-uzun gemi yaklaşımına dayanarak ortaya konmuştur. Havelock (1928) ve Lunde (1952) çalışmalarında dalga direncinin analitik olarak hesaplanmasına önemli katkılarda bulunmuşlardır.

Dalga direnci günümüzde hesaplamalı olarak panel metodu, sınır elemanlar, ya da sonlu hacimler gibi sayısal yöntemlerle hesaplanabilmektedir. Bu yaklaşımların başında serbest su yüzeyi sınır koşullarının nasıl uygulanacağı gelir. Çünkü dalga-direnci sınır değer probleminin en büyük zorluğu, lineer olmayan serbest yüzey sınır koşuludur. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, serbest yüzey sınır koşullarının tam olarak uygulanması amaçlanmıştır. Bu çalışmada da gemi dalga direnci problemi çözüm yöntemlerine katkıda bulunabilmek, hidrodinamik dizayn için lineer olmayan etkileri katabilmek için serbest su yüzeyi koşullarını tam olarak sağlamayı amaçlayan sayısal bir yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır.

### Lineer olmayan analiz girişimleri

Lineer olmayan sınır koşullarını kullanabilmek için araştırmacılar iki temel yöntem üzerinde durmuşlardır; bunlar daimi iteratif ve zaman adımlı yöntemlerdir. Literatüre bakıldığında her

iki yöntemi de uygulamaya çalışmış bir çok araştırmacı görülür. Korving ve Hermans (1977), Daube ve Dulieu (1981) lineer olmayan sınır koşullarını iteratif olarak sağlamaya çalışan öncülerdir. Üç boyutlu bir akımda, tam anlamıyla lineer olmayan sınır koşullarını uygulamadaki ilk girişimlerden biri Xia (1986) tarafından yapılmıştır. Bu çalışma serbest yüzey koşullarının iteratif çözüm içerisinde bir önceki çözüme göre küçük değişiklikler olduğu varsayımıyla lineerleştirildiği prototip bir çözüm yöntemi içermektedir. Coleman (1981) sonlu farklar ile Laplace denklemini ayırıklaştırmıştır. Bu yöntem tüm çözüm bölgesinin ayırıklaştırılmasını gerektirmiştir. Zamana bağlı olarak yapılan analizlerde başarılı sonuçlar bulunmuştur. Çelebi ve diğerleri (1997) çalışmalarında, sınır integral yöntemini kullanarak daimi olmayan problemleri çözmeye çalışmıştır. Lineer olmayan serbest yüzey problemi için bir diğer Sınır Eleman Yöntemi çözümü de Campana ve diğerleri (1989) tarafından önerilmiştir. Bu çalışmada lineer olmayan serbest yüzey koşulları iteratif bir algoritma içerisinde uygulanmış ve çözüm tek katlı potansiyel formunda verilmiştir.

Raven (1996) çalışmasında tekilliği kaldırılmış panel yöntemi kullanarak lineer olmayan sınır koşullarını iteratif bir algoritma içerisinde sağlamaya çalışmıştır. Bu çalışmada serbest yüzey panelleri serbest yüzeyden belirli bir miktar yukarı konumlandırılmış ve serbest yüzey üzerine kollokasyon noktaları yerleştirilerek serbest su yüzeyi koşullarının bu noktalarda sağlandığı düşünülmüştür.

Özet olarak, daimi iteratif yöntemlere bakıldığında, genel bir yakınsama sorunu olduğu görülmektedir. Yayınlanan sonuçların, lineerleştirilmiş sonuçlara göre deneyle daha fazla uyum içinde olduğu görülür. Diğer taraftan zamana bağlı çözümler de ümit vaat edici görülmektedir. Fakat bu yöntemlerde kullanılan hesaplama süreci oldukça yavaştır ve daimi durumdaki sonuçlara ulaşmak uzun zaman almaktadır.

Sonuç olarak her iki yaklaşımın da avantajları ve dezavantajları vardır. Zaman adımlı yaklaşım için, bizim açımızdan en büyük dezavantaj, ge-

rektirdiği büyük bilgisayar kapasitesi ve hızıdır. Daimi iteratif yöntemde ise büyük bir bilgisayar kapasitesi gerekmemektedir, ayrıca bu konuda elimizde yeterli bilgi birikiminin olması da önemli bir avantajdır. Bu nedenle bu çalışmada geliştirilen hesaplama yöntemi, daimi iteratif bir yaklaşıma dayanmaktadır

### Dalga direncinde sayısal yöntemler

Dalga direnci, gemi form değişikliklerine karşı çok hassas olduğu için bir hidrodinamik dizayn parametresidir. Form değişimlerinin dalga direncine etkisini, deneysel çalışmalarla görmeye çalışmak, model imalatında harcanan zaman ve model imalat maliyetleri açısından, efektif olmayacaktır.

Gemi form değişikliklerinin, dalga direnci üzerindeki etkisini daha çabuk görebilmek ve dalga direncini azaltacak yeni gemi formları bulmanın etkili yolu, dalga direncini sayısal olarak hesaplamaktan geçmektedir. Danışman ve diğerleri (2002) ve Çalışal ve diğerleri (2002) çalışmalarında, gemi dalga direncinin hesaplamalı olarak elde edilmesinin, gemi form dizaynına nasıl yardımcı olacağını göstermişlerdir.

Gemi dalga direnci probleminin bir sınır değer problemi olarak tanımlanabilmesi ve hesaplama araçlarının kapasitesinin artması sayesinde, dalga direnci hesaplama yöntemleri geliştirilebilmiştir, bunlardan başlıcaları Gadd (1976) ve Dawson (1977)'nin çalışmalarında sunulmuştur. Özellikle Dawson yöntemi üzerine, 80'lerden beri pek çok araştırmacı bir çok ilerlemeler yapmıştır. Bu yöntem bir çok araştırma kurumu tarafından, olgunlaşmış bir yöntem olarak anılmaktadır.

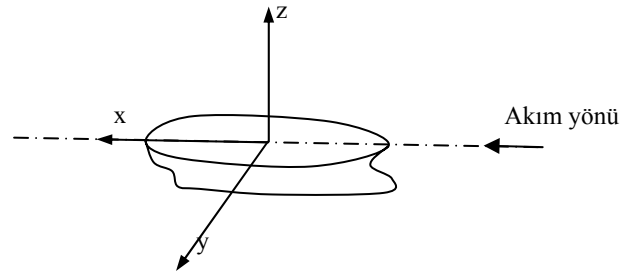
Gadd (1976) yönteminde gemi ve serbest yüzeyin bir kısmı dörtgen panellerle temsil edilmiştir. Paneller üzerine Rankine kaynakları dağıtan Gadd, serbest su yüzeyi koşullarını iteratif bir süreç içerisinde uygulamıştır. Dawson yönteminde ise, yine gemi ve serbest yüzey dörtgen panellerle temsil edilmiş ve gemi üzerindeki akım çözümü Hess ve Smith (1964) ya göre yapılmıştır. Serbest yüzey koşulları ise çift gövde

yaklaşımıyla lineerleştirilmiş ve Dawson tarafından önerilen bir türev şemasıyla, serbest yüzey üzerine uygulanmıştır.

### Problemin tanımı

Gemi dalga direnci probleminin teorisi üzerinde bir çok araştırmacı çalışmış ve bu problemi daha iyi tanımlaya çalışmışlardır. Bunların başında Sabuncu (1962), Newman (1969) sayılabilir.

Gemi dalga direnci problemini daha iyi anlamak için problemi tanımlayan bir takım kabuller yapılmalıdır, bunlar şu şekilde sıralanabilir; gemi rijit bir cisimdir, koordinat sistemi Şekil 1'de görüldüğü gibi gemi üzerine sabitlenmiştir ve gemi +x eksen yönünde U hızlı bir akım içindedir, geminin içinde yüzdüğü akışkan sabit yoğunlukta ve sıkıştırılmazdır, geminin içinde bulunduğu akım çevrisizdir.



Şekil 1. Koordinat sistemi

Yukardaki tanımlamalar doğrultusunda, gemi etrafındaki akışın, potansiyel akış olacağını söyleyebiliriz. Bu durumda  $\Phi(x, y, z)$  hız potansiyeli olmak üzere, hareketi tanımlayan denklem Laplace denklemidir:  $\nabla^2 \Phi = 0$ . Problemi sınır değer problemi olarak çözebilmek için, gemi ve serbest yüzey üzerindeki sınır koşullarının tanımlanması gerekir. Gemi yüzeyi üzerindeki sınır koşulu akışkan hızının normal doğrultusundaki bileşeninin geminin normal doğrultusundaki hız bileşenine eşit olmasını gerektirmektedir. Koordinat sistemi gemiye birlikte sabitlenmiş olduğundan, akışkanın normal doğrultusundaki hızının 0 olması gerekir.

$$\Phi_n = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{n} \cdot \nabla \Phi = 0 \quad (\text{gemi yüzeyinde}) \quad (1)$$

Serbest su yüzeyinde ise, momentumun korunumundan Bernoulli denkleminde ulaşılabilir:

$$p - p_\infty = -\frac{1}{2}\rho(V^2 - U^2) - \rho gz \quad (2)$$

ve serbest yüzey üzerinde basınç sabit olduğundan, dinamik serbest su yüzeyi koşulu şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{1}{2}(V^2 - U^2) + gz = 0 ; \quad z = \zeta \text{ için} \quad (3)$$

Eğer  $z = \zeta(x, y)$  serbest su yüzeyini tanımlayacak olursa kinematik koşul olarak;

$$\Phi_z - \Phi_x \zeta_x - \Phi_y \zeta_y = 0 ; \quad z = \zeta \text{ için.} \quad (4)$$

verilebilir

### Serbest su yüzeyi koşullarının lineerleştirilmesi

Gemi dalga direnci problemi ile ilgilenen birçok çalışmada, lineer olmayan sınır koşullarını uygulayabilmek için dahi olsa, geliştirilen yöntemin bir kısmında serbest yüzey sınır koşullarının lineerleştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Serbest sınır koşullarının doğrudan lineer olarak kullanıldığı bir yöntemde, lineerleştirmenin yapıldığı şekli yöntemin sonuçlarının duyarlılığına doğrudan etki etmektedir. Yavaş gemi yaklaşımı ile serbest su yüzeyi koşullarının lineerleştirilmesi, gemi dalga direnci problemi ile ilgilenen araştırmacıların kullandığı, başlıca yöntemlerden biridir. Newman (1976) çalışmasında, lineerleştirmede yavaş gemi yaklaşımını detaylı bir şekilde incelemiştir.

Newman'ın analizinde, yavaş gemi yaklaşımının lineer sınır-değer problemine eşdeğer olduğunu göstermek için, hız potansiyelini aşağıdaki formda ifade edilmiştir.

$$\Phi = U(\phi_0 + \phi_1) \quad (5)$$

Burada  $\phi_0$ ; geminin su altındaki geometrisinin, serbest su yüzeyine göre ayna simetrisinin alındığı, çift gövde yaklaşımına göre bulunan hız potansiyelidir.  $\phi_1$  ise serbest su yüzeyinin varlığından dolayı, hız potansiyelindeki değişimleri gösteren perturbasyon hız potansiyelidir. Bu ifade serbest su yüzeyi koşulunda yerine konulursa;

ğından dolayı, hız potansiyelindeki değişimleri gösteren perturbasyon hız potansiyelidir. Bu ifade serbest su yüzeyi koşulunda yerine konulursa;

$$\phi_{0z} + \phi_{1z} = -\frac{U^2}{2g} \nabla(\phi_0 + \phi_1) \cdot \nabla [(\nabla(\phi_0 + \phi_1))^2] \quad (6)$$

$z = \zeta$  'da

elde edilir, ve;

$$\zeta(x, y) = -\frac{U^2}{2g} \{(\nabla(\phi_0 + \phi_1))^2 - 1\} \quad (7)$$

Gemi boyu ölçeğinin mertebesi 1 kabul edilirse çift gövde potansiyelinin mertebesi de  $O(1)$  olur. İlk kabule göre ileri doğru hızın küçük olması gereklidir, bir başka deyişle;

$$\frac{U^2}{2g} \equiv \varepsilon \ll 1 \quad (8)$$

Bu yaklaşım (7) denkleminde uygulanır ve gerekli ara işlemler yapılırsa ;

$$\zeta = -(\phi_{0x}^2 + \phi_{0y}^2 - 1)_{z=0} + O(\varepsilon^2) \quad (9)$$

ve

$$\phi_{1z} = -2\varepsilon \{ \phi_{0x}^2 (\phi_{0xx} + \phi_{1xx}) + 2\phi_{0x}\phi_{0y} (\phi_{0xy} + \phi_{1xy}) + \phi_{0y}^2 (\phi_{0yy} + \phi_{1yy}) \} - \zeta \phi_{0zz} + O(\varepsilon^2) \quad (10)$$

elde edilir. Son eşitlikte  $\zeta$  ; (9)'den elde edilir ve  $\phi_1$  'in türevleri bu serbest yüzeyde alınır  $\phi_0$  'in türevleri ise  $z=0$  da alınır.

Burada elde edilen (10) denklemi yavaş gemi yaklaşımına göre lineerleştirilmiş serbest su yüzeyi koşuludur. Bu ifade perturbasyon hız potansiyeli  $\phi_1$  'e göre lineerdir.

### Lineer olmayan problem için iteratif bir algoritma

Lineer yöntemlerle bulunan dalga deformasyonları deneysel sonuçlarla ölçülen dalga deformasyonlarıyla karşılaştırıldığında, deneyde gö-

rülen bir takım dalga bileşenlerinin hesapta kaybolduğu veya hesaplanamadığı görülmektedir. Bu durumun, çözüm bölgesinin ayrıklaştırılması, yapılan kabuller ve sayısal hatalarla ilgisi olduğu kadar serbest yüzey sınır koşulunun lineerleştirilerek uygulanmasıyla da ilgisi vardır.

Sayısal uygulamaya geçebilmek için, model üzerinde birçok kabul ve basitleştirilmeye gidilmektedir. Örneğin; sıkıştırılmaz akım, çevrimsiz akım vb. Bunlara ek olarak yapılan en büyük basitleştirme sınır koşullarının lineerleştirilmesidir. Sınır koşullarının olduğu gibi uygulanması, yapılan sayısal çözümün fiziksel olayı temsil için bir adım daha iyileştirilmesi anlamına gelmektedir.

Gemi dizaynı açısından, gemi etrafındaki dalga deformasyonlarının daha doğru hesaplanması, geminin akım karakteristiklerini daha iyi anlamaya ve dizaynı geliştirmeye yardımcı olacaktır.

Ek olarak lineer çalışmalarda basınç alanının ıslak yüzey üzerindeki integrasyonu sakın su düzlemine göre yapılmaktadır. Halbuki bu işlemi dalga deformasyonu ile belirlenen tüm ıslak yüzeyde yapmak gerekir ve bu ancak lineer olmayan bir yaklaşımla mümkündür

### Temel fikir

Geliştirilen çözüm algoritması serbest su yüzeyi koşulunu aşağıdaki şekilde ele almaktadır:

- $\phi^{(n)}$  : “n”inci iterasyon adımıdaki hız potansiyeli  
 $\delta\phi$  : Her bir iterasyonda hesaplanan hız potansiyeli farkı.

Benzer tanımlamalar dalga deformasyonu ( $\zeta$ ) için de geçerli olup şu kabuller yapılabilir;

$$\phi^{(n)} = \phi^{(n-1)} + \delta\phi, \quad \zeta^{(n)} = \zeta^{(n-1)} + \delta\zeta$$

Bu ifadeleri, kinematik serbest su yüzeyi koşulunda yerine koyarsak;

$$\begin{aligned} \phi_z^{(n-1)} + \delta\phi_z - \phi_x^{(n)} \zeta_x^{(n)} - \phi_y^{(n-1)} \delta\phi_y \\ - \delta\phi_x \zeta_x^{(n-1)} - \delta\phi_y \zeta_y^{(n-1)} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

elde ederiz. Aynı şekilde dinamik su yüzeyi koşulu kullanılarak;

$$\zeta^{(n-1)} = \frac{U^2}{2g} \left\{ 1 - \frac{1}{U^2} (\nabla\phi^{(n-1)})^2 \right\} \quad (12)$$

yazılabilir (6) denklemini (5) te yerine koyup gerekli açılımlar yapılırsa;

$$\begin{aligned} \nabla\phi^{(n-1)} \cdot \nabla(\nabla\phi^{(n-1)} \cdot \nabla\phi^{(n)}) \\ - \nabla\phi^{(n-1)} \cdot \nabla(\nabla\phi^{(n-1)})^2 \\ + \frac{1}{2} \nabla\phi^{(n)} \cdot \nabla(\nabla\phi^{(n-1)})^2 + g\phi_z^{(n)} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

elde edilir. Bu denklem aslında lineer olmayan serbest yüzey sınır koşuludur. Ancak dikkatli bakıldığında, bir önceki iterasyona göre lineer olduğu görülür. Bu da bu sınır koşulunun iteratif bir algoritma ile kullanıldığında, iterasyonlar arasında lineer çözüm yapılabileceğini gösterir.

### Serbest su yüzeyinde ayrıklaştırma

Lineer olmayan sınır koşullarının uygulanmasında, serbest yüzey için iki modelleme önerilmektedir. Bunlardan bir tanesi tekilliği kaldırılmış paneller yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda, paneller sakın serbest su yüzeyinden belirli bir yüksekliğe konumlandırılırlar ve serbest su yüzeyi üzerine, serbest yüzey sınır koşullarının sağlanacağı, kollokasyon noktaları dağıtılır. Her iterasyon adımıda kollokasyon noktaları, değişen serbest yüzey üzerine yeniden dağıtılır. Bir diğer yöntem ise, serbest yüzey panellerinin, her iterasyonda değişen serbest yüzey üzerine dağıtılmasına dayanan, adaptif yaklaşımdır. Birinci yaklaşımda, panellerle kollokasyon noktaları arasındaki mesafe, hesabın duyarlılığı üzerinde büyük öneme sahiptir. İkinci yaklaşımda ise, her iterasyon adımıda, panel geometrilerinin değişmesi, sayısal zorluklar getirmektedir. Bu çalışmada, her iki yaklaşımdan farklı olarak, serbest yüzey panelleri, iterasyon adımlarında sakın serbest su yüzeyi düzlemine paralel kalacak şekilde, düşey olarak yer değiştirmektedir. Şekil 3’te, iterasyon adımlarında deforme olan serbest yüzeye göre yer değiştiren, serbest yüzey panellerinin küçük bir bölümü görülmektedir. Bu

yaklaşım yukarıda anlatılan yaklaşımlarda görülen dezavantajları içermemektedir.

### Algoritma

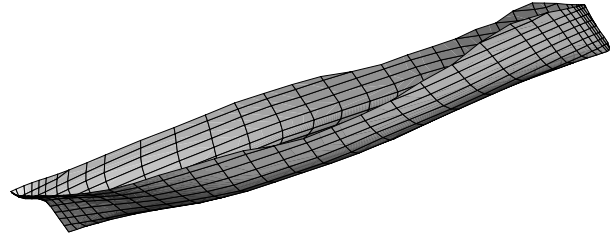
Geliştirilen algoritmanın temel adımları aşağıdaki gibidir:

1. Serbest yüzey deformasyonları için bir tahmin yap, ve bu tahmini serbest yüzey üzerinde başlangıç hız dağılımı ( $\nabla\phi^{(n)}$ ;  $n=0$ ) bul. Bu adımda aslında tahmin yerine klasik Dawson (1977) çözümü yapılır. Çözümüne bu şekilde başlanması iterasyon sürecinin yakınsama hızını olumlu etkilemektedir.
2. Gemi ve serbest yüzey üzerinde bir panel dağılımı tanımla.  
Gemi ile serbest yüzey dörtgen panellerle temsil edilir. Başlangıçta geminin sakin su yüzeyi seviyesinin üzerinde kalan geometrisi de panellenir. Daha sonra bu paneller değişen serbest yüzey şekline göre gemi ıslak alanının uyum sağlaması amacıyla kullanılır.
3. Serbest yüzey üzerinde (15) denklemi ile belirlenen serbest yüzey sınır koşulunu uygula. Gemi üzerinde rijit cisim sınır koşulunu uygula ve lineer denklem takımı sistemini çöz.  
Bu adımda serbest su yüzeyi koşulu Dawson (1977)'de verildiği şekilde uygulanmaktadır. Ancak burada, iterasyon adımlarında deforme olan serbest su yüzeyinden dolayı, çift gövde yaklaşımı kullanılamayacaktır. Orijinal Dawson yöntemindeki çift gövde hız potansiyelinin yerini bu çalışmada bir önceki iterasyonda hesaplanan toplam hız potansiyeli almaktadır.
4. Hız ve basınç alanını hesapla. Dinamik koşul yardımıyla dalga deformasyonlarını yeniden hesapla. Direnç, düşey kuvvet ve trim momentlerini gemi üzerindeki basınçları integre ederek hesapla.
5. Serbest su yüzeyi panellerini deforme olmuş serbest su yüzeyine adapte et.
6. Yakınsamayı kontrol et ve gerekiyorsa (2) adımından itibaren tekrar et.

### Geometrik adaptasyon

Dawson yönteminde kullanıldığı şekliyle, sakin su düzlemine kadar yapılan gemi yüzeyi panellenmesinin, lineer olmayan hesaplama süreci

için değiştirilmesi ve geliştirilmesi gerekmektedir. Lineer olmayan çözüm yönteminde serbest su yüzeyi düzlemselliğini kaybettiği için çift gövde yaklaşımı kullanılamaz hale gelmektedir. Bunun için yöntemde hesaplanan gemi üzerine dağıtılmış paneller üzerindeki birim şiddette kaynağın diğer panellere etkittiği hız bileşenlerinin çift gövde olmadan hesaplanması gerekmektedir.



Şekil 2. İterasyon adımları arasında yüklü su hattının değişimi

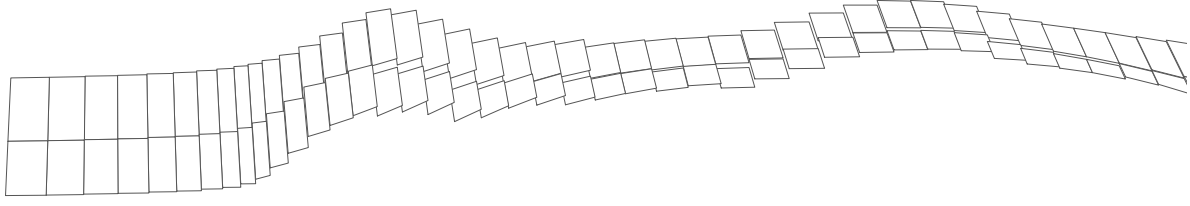
Her iterasyon adımında, deforme olmuş serbest su yüzeyindeki hız bileşenleri yeniden hesaplanmalıdır, çünkü bu hız bileşenleri, bir sonraki iterasyon adımında bilinen çözüm olarak kullanılacaktır ( $\nabla\phi^{(n-1)}$ ). Bu amaçla serbest su yüzeyinde, bir önceki iterasyondaki düğüm noktaları, alan noktaları olarak tanımlanır. Bu noktalar üzerinde hız bileşenleri yeniden hesaplanır.

Lineer olmayan algoritmanın tam olarak gerçekleştirilebilmesi için, geminin değişen serbest yüzeyle ara kesiti alınmalı ve hesaba dahil olan yüklü su hattı üzerindeki geometriyle, hesaba dahil edilmeyecek olan yüklü su hattı geometrisi belirlenmelidir gerekir. Bu yeni geometriye göre, gemi yeniden panellenecek ve bir sonraki iterasyon için hazır hale gelecektir.

### Gemi geometrisinin serbest yüzeyle ara kesitinin alınması ve yeniden panellenmesi

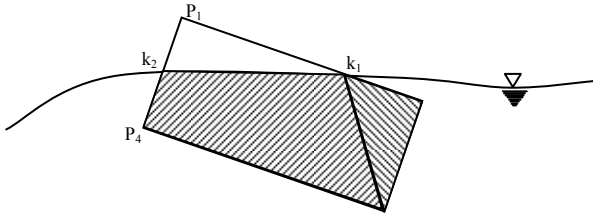
Bu işlem için üç boyutlu olarak gemiyi tanımlayan ve serbest su yüzeyi ile geminin ara kesitini çıkarıp, ıslak ve kuru geometriyi tanımlayarak yeniden panellenen, bir geometrik yaklaşım geliştirilmiştir.

Bu yaklaşıma dayanarak yazılmış program, öncelikle bütün panelleri tarayarak üçgen veya



Şekil 3. Serbest su yüzeyi panelleri

dörtgen olup olmadıklarını ve hangi köşelerinin su üzerinde kaldığını saptar. Tüm köşeleri su altında (deforme olmuş serbest yüzey) kalan paneller üzerinde herhangi bir işlem yapılmaz. Bir veya birden fazla köşesi deforme olmuş serbest yüzey dışında kalan paneller, yeni dörtgen veya üçgen paneller oluşturacak şekilde bölünürler. Elde edilen yeni köşe noktalarının koordinatları ve indisleri data dosyasına işlenir. Aşağıdaki şekilde bir panelin serbest su yüzeyiyle kesişmesi görülmektedir.



Şekil 4. Bir dörtgen panel ile deforme olmuş su hattının kesişimi

Şekildeki dörtgen panel  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  noktalarından oluşmaktadır ve  $P_1$  ile gösterilen köşe noktası, deforme olmuş serbest yüzeyin dışında kalmıştır. Bu durumda, su hattı altında kalan kısmın yeniden panellenmesi gerekmektedir. 5 kenarı olan bu geometrinin, bir dörtgen ve bir üçgen panele ayrılması ile, gerekli ayrıklaştırma yapılmış olacaktır. Taralı bölmeden de görüldüğü üzere, dörtgen panel  $k_2$ ,  $k_1$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  noktalarından, üçgen panel ise  $k_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $k_1$  noktalarından oluşacaktır. Orijinal panelin deforme olmuş su hattıyla kesişimi olan,  $k_1$  ve  $k_2$  noktalarının, x ve y bileşenleri, panelin profil izdüşümü yardımıyla, kolayca bulunabilir. Bu noktadaki yarı genişlikler ise, gemi üzerinde tanımlanan 3 boyutlu spline yüzeyi üzerinde, interpolasyon yapmak suretiyle bulunmuştur.

### Sayısal çalışma ve sonuçları

Geliştirilmiş olan hesaplama algoritmasının denenmesi amacıyla, bir hesaplama programı yazılmış (ITU-NONLIW) ve referans bir gemi geometrisi alınarak, buna ait akış karakteristikleri belirlenmiştir. Lineer serbest su yüzeyi koşullarının kullanıldığı hesaplama programı ITU-Dawson (Gören (1993)) ve deneysel sonuçlarla (IIHR (2000)) karşılaştırmalar yapılarak, geliştirilmiş olan hesaplama programının lineer olmayan analize katkıları ve hesaplama kapasitesi belirlenmiştir.

### Örnek (referans) gemi geometrisi: Seri 60

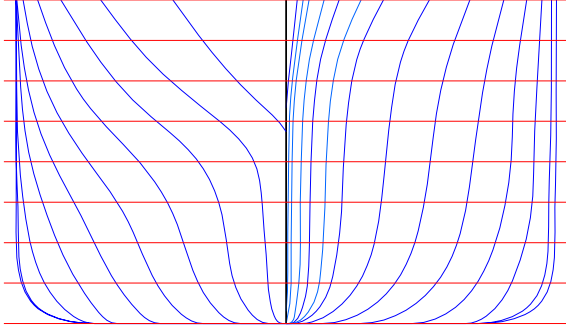
Bu çalışmada referans olarak, geliştirilen hesaplama programının sonuçlarının test edilmesi amacıyla, standart Seri 60 formu ele alınmıştır. Seri 60 formları, blok katsayıları ( $C_B$ ) 0.60 ile 0.85 arasında değişen gemilerdir. Bir çok tipte gemi, uzun yıllardan beri Seri 60 formlarına dayanılarak dizayn edilmiştir. Orijinalde yumru başı olmayan bu formlar, son yıllarda yapılan çalışmalarla, yumru başlı hale de dönüştürülmüştür. Bütün form karakteristikleri çok iyi bilinen bu gemilerle ilgili, bir çok araştırma kurumu detaylı hesaplamalı ve deneysel çalışmalar yapmışlardır, IIHR (2000). Aşağıda, sayısal hesaplamalarda en çok kullanılan form olan Seri 60  $C_B=0.60$  formunun en kesitleri görülmektedir (Şekil 5).

Yapılacak hesaplamalar için gemi 744 adet panelle ayrıklaştırılmıştır. Serbest yüzeyde ise hassas, orta ve kaba olarak üç ayrı panel yoğunluğu kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla 2856, 2088, 1680 adet panelden oluşmaktadır (Şekil 6 ve 7).

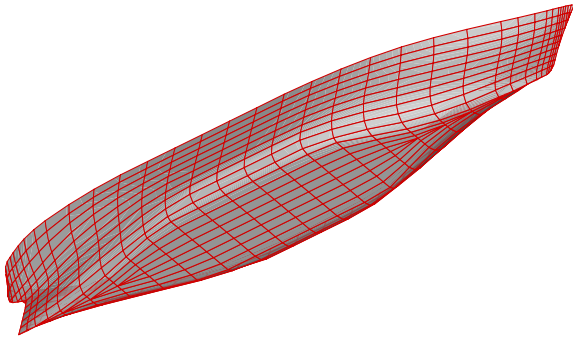
### Duyarlılık analizi

Hesabı yapılan panel yoğunluklarına göre, ITTC (1999) takip edilerek duyarlılık analizi de yapılmıştır. Yapılan duyarlılık analizi yönteminde en az 3 adet panel yoğunluğuna ihtiyaç vardır.

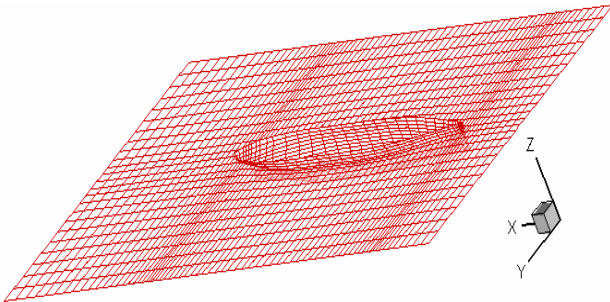
Örneğin; yüksek yoğunluklu panel dağılımı için elde edilen sonuç  $\hat{S}_{k_1}$ , orta için  $\hat{S}_{k_2}$  ve az yoğun için  $\hat{S}_{k_3}$  olsun. Orta-yüksek ve az-orta için çözüm farkları ( $\varepsilon$ ) ve bunların oranları aşağıdaki şekilde ifade edilirler.



Şekil 5. Seri 60 En kesitleri



Şekil 6. Seri 60 formunun dörtgen panellerle ayrıştırılması



Şekil 7. Seri 60 formu ve etrafındaki serbest su yüzeyinin panellerle ayrıştırılması (orta yoğunluk)

$$\varepsilon_{21_k} = \hat{S}_{k_2} - \hat{S}_{k_1}$$

$$\varepsilon_{32_k} = \hat{S}_{k_3} - \hat{S}_{k_2}$$

$$R_k = \frac{\varepsilon_{21_k}}{\varepsilon_{32_k}}$$

Bu ifadeye göre, üç adet yakınsama koşulu söz konusudur.

1. Yakınsama durumu:  $0 < R_k < 1$
2. Salınım durumu:  $R_k < 0$
3. İraksama durumu:  $R_k > 1$

Aşağıdaki üç farklı panel yoğunluğu için duyarlılık analizi görülmektedir. Analiz yapılırken, hesap sonucu olarak bulunan dalga yüksekliklerinin maksimumlarının toplamı göz önüne alınmıştır, (Tablo 1).

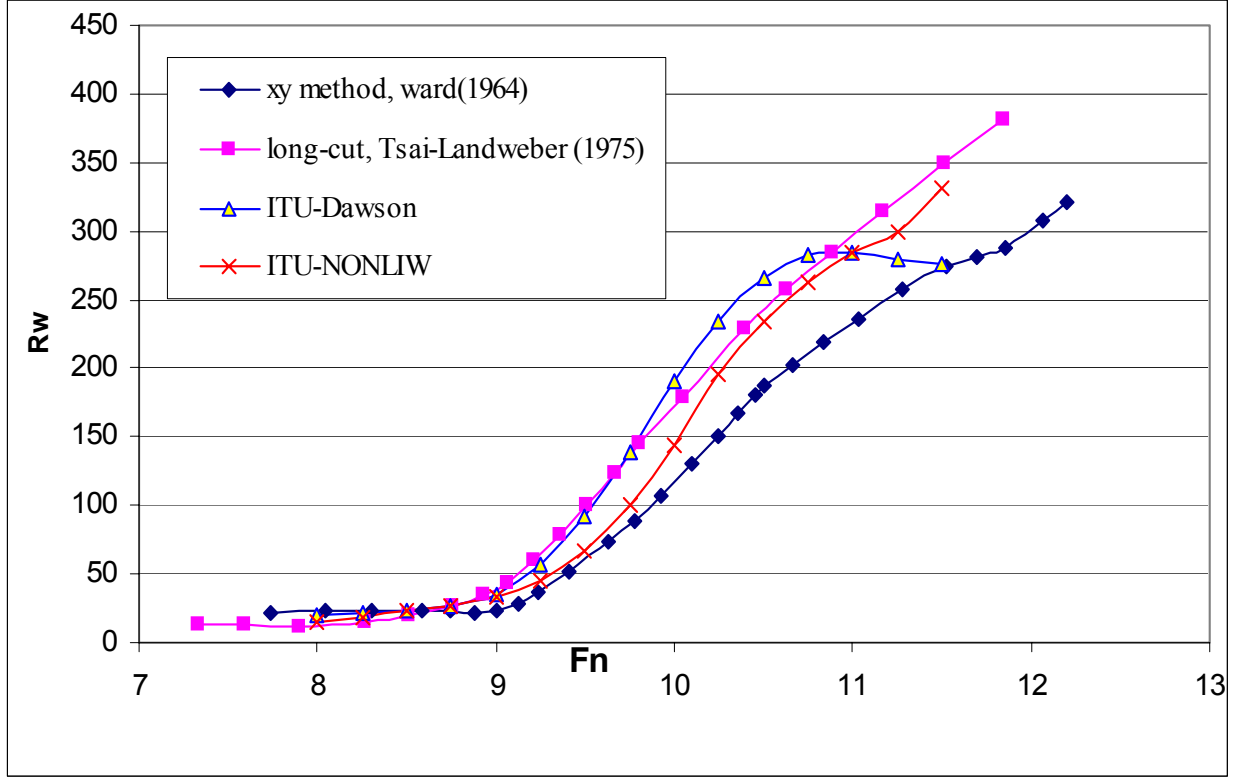
Tablo 1. Panel yoğunluğuna göre Duyarlılık Analizi Tablosu

	Hassas (2856 Panel)	Orta (2088 Panel)	Kaba (1680 Panel)
$\hat{S}_k = \sum \zeta_{\max}$	0.0623	0.0616	0.0609
$\varepsilon_{21_k} = \hat{S}_{k_2} - \hat{S}_{k_1}$		0.007	
$\varepsilon_{32_k} = \hat{S}_{k_3} - \hat{S}_{k_2}$			0.0616
$R_k = \frac{\varepsilon_{21_k}}{\varepsilon_{32_k}}$		0.0114	

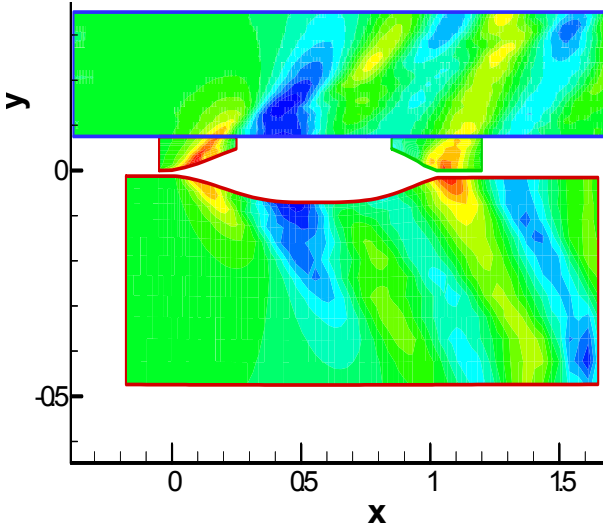
Tablodan da görülebileceği gibi hesaplama yöntemi, panel sayısı arttıkça belirli bir sonuca yakınsama göstermektedir, ve bu haliyle algoritma ve programın panel yoğunluğuna göre hassas olmadığı (yani bağıl olarak stabil olduğu) söylenebilir.

Aşağıdaki şekillerde, ITU-NONLIW programı kullanılarak yapılan hesaplama sonuçlarının karşılaştırmaları görülmektedir. Şekil 8'de boyutlu olarak dalga direnci karşılaştırmaları verilmiştir. Burada, ITU-NONLIW programının, lineer sınır koşullarını kullanan ITU-Dawson programına göre, deneysel sonuçlarla daha uyumlu olduğu görülebilir. Şekil 9 ve Şekil 10'da, gemi etrafındaki dalga sisteminin kontur hatları görülmektedir. Bu grafiklerde de lineer olmayan sınır koşullarının, deneysel verilerle daha uyumlu sonuçlar verdiği görülebilir.

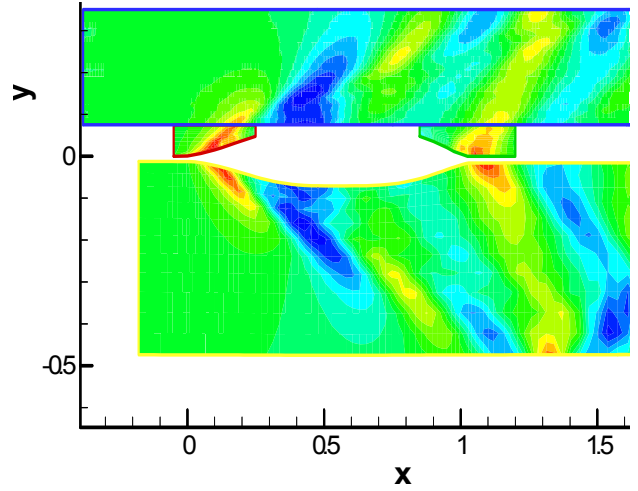




Şekil 8. Dalga direnci karşılaştırması



Şekil 9. DeneySEL ve lineer hesapla bulunan dalga konturları. (üst taraf deneysel, IIHR (2000), alt taraf hesap,  $Fn=0.312$ )

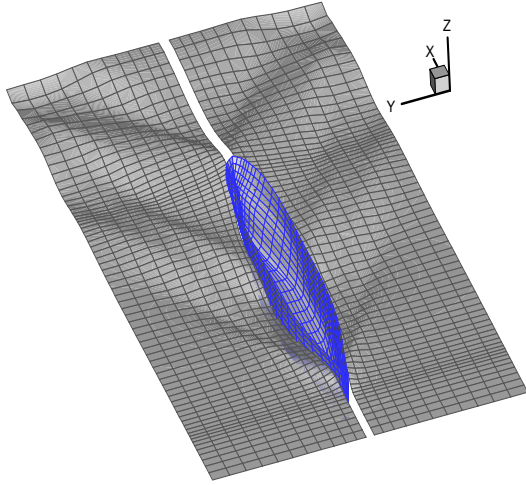


Şekil 10. DeneySEL ve lineer olmayan koşullarla bulunan dalga konturları. (üst taraf deneysel IIHR (2000), alt taraf hesap,  $Fn=0.312$ )

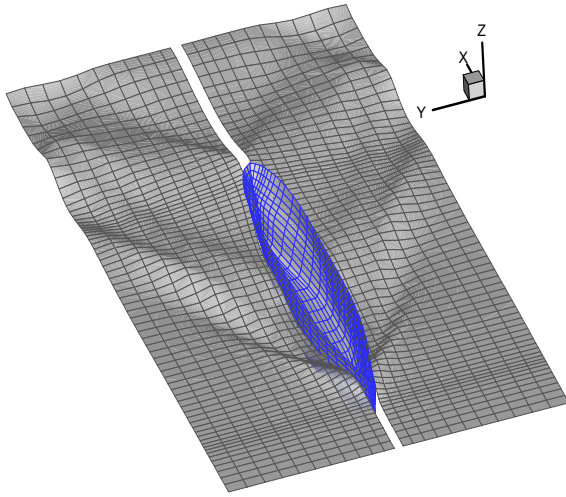
Şekil 11 ve Şekil 12'de, üç boyutlu olarak gemi etrafındaki dalga sistemi görülmektedir. Bu şekillerde, lineer koşullarla yapılan hesapta, gemi etrafındaki dalga sisteminde bazı dalga bileşenlerinin yutulduğu görülmektedir.

### Su üstü geometrisinin lineer olmayan analizdeki yeri

Geliştirilmiş olan hesaplama yönteminde, yükselen baş dalga nedeniyle, geminin sakin su düzlemi üzerindeki geometrisi de hesaba katılabilmektedir.



Şekil 11. Lineer koşullar ile bulunmuş üç boyutlu dalga deformasyonları,  $F_n=0.312$

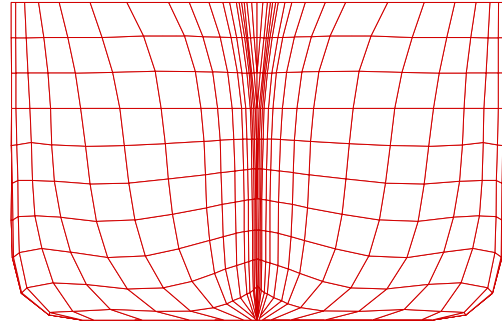


Şekil 12. Lineer-olmayan koşullar ile bulunmuş üç boyutlu dalga deformasyonları,  $F_n=0.312$

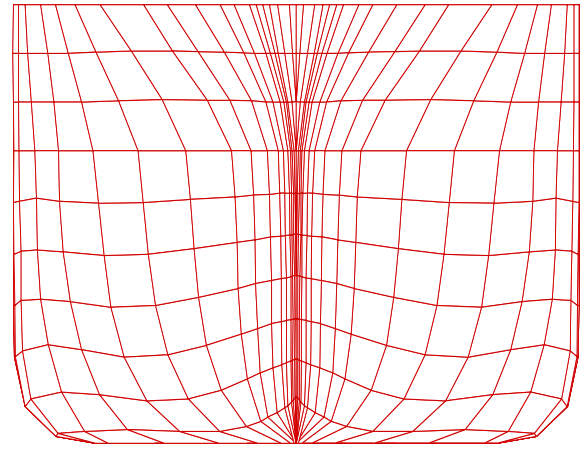
Geminin baş tarafında, yüklü su hattının üzerinde kalan geometri (fleyr), gemi direnci ve hareketleri açısından önemli bir rol oynamaktadır. Fleyr geometrisinin dizaynı, serpinti direncine, dövünmeye, güverte ıslanmasına kadar pek çok hidrodinamik karakteristiği belirlemektedir.

Bu çalışmada, fleyr'in direnç üzerindeki etkisine bakılmıştır. Fleyr'in dizaynına göre, su hattı giriş açıları değişmekte ve bu da dalga kırılması ya da serpinti oluşumuna neden olabilmektedir. Bu çalışmada geliştirilmiş olan hesaplama programı, potansiyel teorinin sınırları içerisinde kaldığından, dalga kırılması ya da sprej oluşumunu

doğrudan gözlemenin olanağı yoktur. Bu olaylar, gemiye yakın dalga deformasyonlarında, dalga yüksekliğinin ya da dalga dikliğinin değişimiyle gözlenebilmektedir. Dalga dikliği arttıkça, dalga kırılması olasılığının artacağı, azaldıkça da dalga kırılması olasılığının azalacağı bilinen bir olgudur. Bu etkileri gözlemleyebilmek için üzerinde hesapları yapılmış olan Seri 60 formundaki gemi, iki değişik deformasyona tabi tutulmuştur, (Şekil 13, Şekil 14 ve Şekil 15).

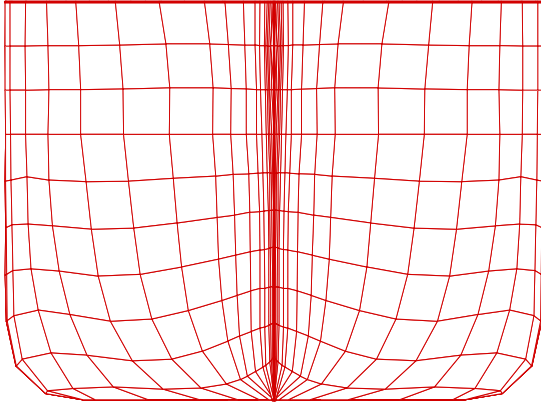


Şekil 13. Orijinal Seri 60 formunun baş taraf en kesitleri

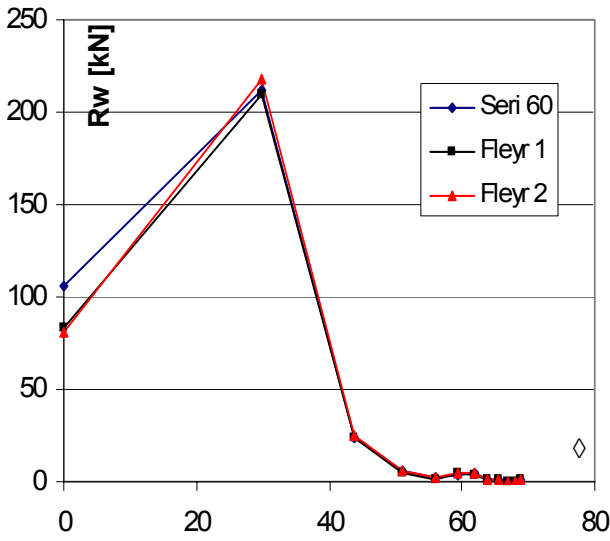


Şekil 14. Seri 60 formunun deforme edilmiş baş taraf en kesitleri (Fleyr 1)

Şekil 16'da, Gadd ve Hogben (1965) çalışması takip edilerek, fleyr geometrisinin dalga bileşenleri üzerindeki etkisi görülmektedir. İki fleyr geometrisinin, diverjans dalgası üzerinde farklı etkileri görülmüştür. Fleyr1 diverjans dalgasını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bunu Fleyr1'in, su hattı geometrisinde, baş taraftaki şişkinlikten dolayı, omuzluğun daha yumuşak bir form almasına bağlayabiliriz.



Şekil 15. Seri 60 formunun deforme edilmiş baş taraf en kesitleri (Fleyr 2)



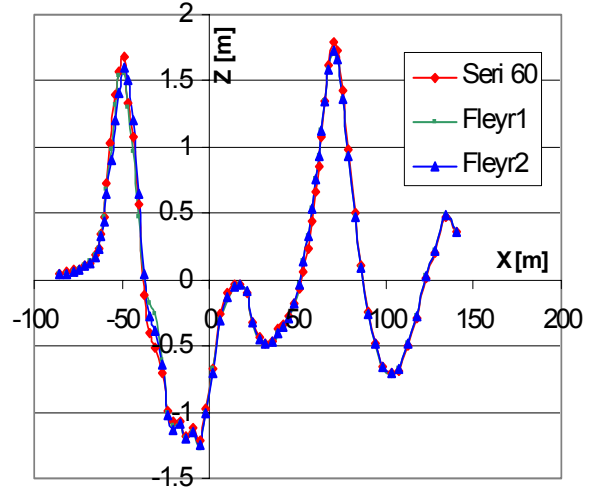
Şekil 16. Su üstü geometrisinin dalga spektrumuna etkisi,  $V=11$  m/sn

Şekil 17'de ise, gemi cidarı üzerindeki dalga profilinin, fleyr geometrisine göre değişimi görülmektedir. Burada, Fleyr1'in Fleyr2'ye göre dalga dikliğinin daha çok olduğu görülür. Bu da, yüksek çalıklıdaki fleyr geometrilerinde görülen dalga kırılma olasılığının artacağını göstermektedir.

## Sonuçlar

Bu çalışmada, lineer olmayan serbest su yüzeyi sınır koşullarını sağlamak için iteratif bir algoritma önerilmiş ve buna ilişkin özgün bir serbest su yüzeyi modelleme yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, tekliği kaldırılmış serbest su yüzeyi panel dağılımı yaklaşımında görülen, pa-

nel-kollokasyon noktası arası mesafe parametrelerini içermemekte ve adaptif serbest su yüzeyi yaklaşımı gibi karmaşık geometrik işlemler gerektirmemektedir.



Şekil 17. Su üstü geometrisinin dalga profiline etkisi,  $V=11$  m/sn

Geliştirilen yöntemin başarısı çeşitli analizlerle gösterilmiş ve deneysel karşılaştırmalar yapılmıştır. Değişik panel sayıları kullanılarak yapılan duyarlılık analizi yöntemin panel sayısına göre stabil olduğunu ortaya koymuştur. Deneysel verilerle yapılan karşılaştırmalarda geliştirilmiş olan yöntemin, lineer yöntemle hesaplanmış sonuçlara göre deneysel verilerle daha fazla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Ayrıca, geliştirilen yöntem iterasyon adımları içerisinde gemi ile serbest su yüzeyinin tam bir ara kesitini aldığı için, geminin hesaba dahil olan ıslak alanı değişmektedir. Buradan hareketle, bu program kullanılarak lineer analizde hesaba katılmayan, geminin sakin su düzleminin üzerindeki geometrisinin de dalga direncine etkisinin gösterilebileceği düşünülmüştür. Bu amaçla sakin su hattı altındaki geometrileri aynı sakin su düzlemi üzerinde fleyr bölümündeki geometrileri farklı, üç adet gemi için hesap yapıp dalga deformasyonlarının ve dalga spektrumunun nasıl değiştiği gösterilmiştir.

Çalışmanın devamı olarak, geliştirilmiş olan hesaplama programının etkin bir gemi form dizaynı aracı olarak kullanılabilmesi için bir form op-

timizasyonu algoritmasıyla birleştirilmesi düşünülmektedir. Böyle bir birleşim ile daha başarılı gemi formları dizayn etmek mümkün olacaktır.

## Kaynaklar

- Campana, E., Lalli, F., ve Bulgarelli, U., (1989). A boundary element method for a non-linear free surface problem, *International Journal For Numerical Methods In Fluids*, **9**, 1195-1206.
- Celebi, M. S., Beck, R. F., (1997), Geometric modeling for fully nonlinear ship-wave interactions, *Journal of Ship Research*, **41**, 1, 1997, 17-25.
- Coleman, R. M., ve Hausling, H.J., (1981). Nonlinear waves behind an accelerated transom stern, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Paris, France.
- Çalışal, S.M., Gören, Ö., Danışman, D.B., (2002), Resistance reduction by increased beam for displacement-type ships, *Journal of Ship Research*, **46**, 3, 208-213.
- Danışman, D.B., Mesbahi, E., Atlar, M., Gören, Ö., (2002), A new hull form optimisation technique for minimum wave resistance, IMAM, Rethymnon-Greece, Paper No. 42.
- Daube, O. ve Dulieu, A., (1981). A Numerical approach of the nonlinear wave resistance problem 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Paris, France.
- Dawson, C. W., (1977). A Practical computer method for solving ship-wave problems, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley, 30-38.
- Gadd, G.E., (1976). A method for computing the flow and surface wave pattern around full forms, Trans, RINA, 207-220, UK.
- Gadd, G.E., Hogben, N., (1965). The determination of wave resistance from measurements of the wave pattern, N.P.L. Ship Report 70.
- Gören, Ö., (1993). Ayna kılıçlı gemilerin Sayısal dalga direnci üzerine, I. Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı, İstanbul.
- Havelock, T. H., (1928). Wave resistance, Proc. Roy. Soc. London, A 118, 24-33
- Hess, J.L., ve Smith, A.M.O., (1964). Calculation of non-lifting potential flow about arbitrary three-dimensional bodies, *Journal of Ship Research*, **8**, 2, 22-44
- IHR, (2000). Series 60 Bare Hull, Iowa University IHR-Hydroscience and Engineering Towing Tank Web Site, <http://www.ihr.uiowa.edu/~towntank/series60bare.htm>
- ITTC Quality Manual., (1999), Uncertainty analysis in CFD, Uncertainty assessment Methodology, 4.9-04 01-01.
- Korving, C., ve Hermans, A.K., (1977). The wave resistance flow problems with a free surface, 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, Paris, France.
- Lunde, J.K., (1952). On the theory of wave resistance and wave profile, *Skipsmodelltankens meddelelse*, 10, 1-123.
- Michell, J. H., (1898). The wave resistance of a ship, *Phil. Mag. (London)*, 45, 106-123.
- Newman, J.N., 1976. *Linearized Wave Resistance Theory*, International Seminar on Wave Resistance, Tokyo/Osaka, Society of Naval Architects Japan, pp. 31-43.
- Raven, H.C., (1996). A Solution method for the nonlinear ship wave resistance problem, Ph.D thesis, MARIN, Netherlands.
- Tsai, C.E. ve Landweber, L., (1975) Further development of a procedure for determination of wave resistance from longitudinal-cut surface-profile measurements, *Journal of Ship Research*, **19**, 2.
- Ward, L.W., (1964), Experimental determination of ship wave resistance from the wave pattern, ONR-Report, Webb Inst. of Naval Architecture, Long Island, N.Y., viii and 68 pages.
- Xia, F., (1986). Numerical calculations of ship flows with special emphasis on the free surface flow, Ph.D. Thesis, Chalmers University, Göteborg, Sweden.
- Sabuncu, T., (1962). *Gemilerin Dalga Direnci Teorisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi Enstitüsü Bülteni, Eğitim Neşriyatı No.1, No. 12, İstanbul.